第 33 卷　第 6 期　　地　震　学　报　　Vol. 33, No. 6
2011 年 11 月　(828-836)　　ACTA SEISMOLOGICA SINICA　　Nov., 2011

吴静，付静静. 2011. 地震电磁卫星监测输电线谐波辐射研究综述. 地震学报，**33**(6)：828-836.
Wu Jing, Fu Jingjing. 2011. A review on power line harmonic radiation monitored by DEMETER satellite. *Acta Seismologica Sinica*, **33**(6): 828-836.

地震电磁卫星监测输电线谐波辐射研究综述*

吴　静♣　付静静

(中国北京 100191 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院)

摘要　输电线谐波辐射已成为近地空间环境的一种人为污染源. 介绍了磁层中输电线谐波辐射现象的研究历史与现状，涉及到与其相关的地基观测和天基观测结果，以及对其形成机理所开展的定性和定量研究等. 特别介绍了近年来利用 DEMETER 地震电磁卫星观测到的输电线谐波辐射现象. 根据现有的研究结果，提出一些尚未解决的问题. 随着我国电网的发展，以及地震电磁监测试验卫星的研制和发射，研究我国上层空间的输电线谐波辐射现象具有重要意义.

关键词　输电线谐波辐射　电离层　磁层　DEMETER 卫星　电磁扰动
doi:10.3969/j.issn.0253-3782.2011.06.013　**中图分类号**：P315.62　**文献标识码**：A

A review on power line harmonic radiation monitored by DEMETER satellite

Wu Jing♣　Fu Jingjing

(*School of Automation Science and Electrical Engineering*, *Beihang University*, *Beijing* 100191, *China*)

Abstract: The power line harmonic radiation (PLHR) becomes a man-made pollution source to the near-Earth space. Both the research history and present status of PLHR were introduced. The research involves the observations of such phenomenon on the ground and onboard satellites, and the qualitative and quantitative analysis of its generation mechnism. Especially, the PLHR observed recently on DEMETER satellite were introduced. Based on the present research result, some unsolved problems were put forward. With the development of electrical industry and the launch of the testing satellite monitoring seismic electromagnetic signals in China, PLHR in upper space needs to pay close attention.

Key words: power line harmonic radiation; ionosphere; magnetosphere; DEMETER satellite; electromagnetic disturbance

* **基金项目**　电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室基金(SKLD09KM06)资助.
收稿日期　2010-12-16 收到初稿，2011-04-21 决定采用修改稿.
♣ **通讯作者**　e-mail: wujing06@buaa.edu.cn

引言

我国电力工业正处于高速发展阶段．随着一系列 750 kV、1 000 kV 高压交流工程的建设，我国电网已步入特高压时代．在高压电网中，电力谐波（谐波次数在 2—40 之间）问题引起了国内外学者的广泛关注，在电力谐波发生、传输、测量、危害及抑制等方面已取得了相当多的研究成果．可以说，在过去的几十年里，电力谐波之所以被关注，主要原因在于它会对公用电网及其它地面系统产生严重的危害．然而，大量的地基和天基观测结果表明，电网中的谐波不仅会对地面上的系统造成危害，还会对空间电离层和磁层产生影响．这种影响主要是通过输电线谐波辐射（power line harmonic radiation，简写为 PLHR）造成的．目前，国外多数学者认为，随着全球电力消耗的增长，PLHR 现象将愈加明显．PLHR 不仅会影响电离层和磁层的状态，这种地面主动激发波的增生，结合被动收测甚低频发射，又会帮助人们直接获取电离层和磁层的能态粒子流数据，以便研究其中的各种动力学过程（熊皓，2004）．因此，研究 PLHR 现象具有重要的意义．

对于 PLHR 现象的研究不仅涉及到电气工程、地球物理、大气物理、空间物理等多学科交叉理论的研究，还涉及到对相关现象的地基观测和空间观测研究，具有较大难度．通过调研发现，国内尚未开展专门的研究工作，但我国地震电磁监测试验卫星的研制和发射已提上日程（张润宁等，2009），这将为深入研究 PLHR 现象创造有利条件．

本文主要介绍 PLHR 的地基观测和天基观测结果，DEMETER 卫星探测到的 PLHR 现象，PLHR 形成机理的研究历史，以及在我国开展相关研究的现实意义．

1　对 PLHR 的观测研究

磁层中的 PLHR 现象最早记录于 1965 年（Helliwell，1965），但是当时它们并没有被识别出来．20 世纪 70 年代，人们开始对 PLHR 的地基观测进行研究．能够说明 PLHR 会对电离层和磁层造成影响的主要地基观测站位于南极洲的 Siple 站和加拿大魁北克的 Roberval 站，它们为地球磁共轭点；另一对磁共轭观测站位于南极洲的 Helley Bay 站和加拿大纽芬兰的 St Anthony 站．

1975 年，美国斯坦福大学无线电科学实验室的 Helliwell 等学者分析了 Siple 站和 Roberval 站的观测数据，发现在 Roberval 站出现了以 60 Hz 为基波频率的谐波辐射谱线．他们认为这些辐射来自于加拿大电力系统，通过与电离层、磁层的等离子体之间的线性和非线性作用，传播到另一半球的 Siple 站，因为同一时间在 Siple 站也观测到了一些谱线，尽管这些谱线的频率间隔并不是准确的 60 Hz（Helliwell *et al*，1975）．由 Helliwell 和 Park 带领的团队对这种现象开展了深入研究．1978 年，他们发现在当地时间 6—18 时之间，3 kHz 附近的 PLHR 达到峰值（Park，Helliwell，1978）．1979 年，他们对 Siple 站 2—4 kHz 频率范围内的磁层波进行研究，发现了 PLHR 的周日效应（Sunday effect）（Park，Miller，1979），即相比于一周内的其它时间，周日的磁层波强度较小．这种效应与地面的电力消耗情况密切相关，如图 1 所示．1983 年，他们得出磁层中的强哨声波通常是由 PLHR 触发的结论．这些触发波在 kHz 频带内占据着重要的位置．由于磁层中的波粒相互作用以及波波相互作用，PLHR 在穿透赤道区的过程中将被放大，当其强度超过一定阈值时，便有可能激发一些波，而这些激发波的频率将偏离PLHR的原始频率（Park，Helliwell，

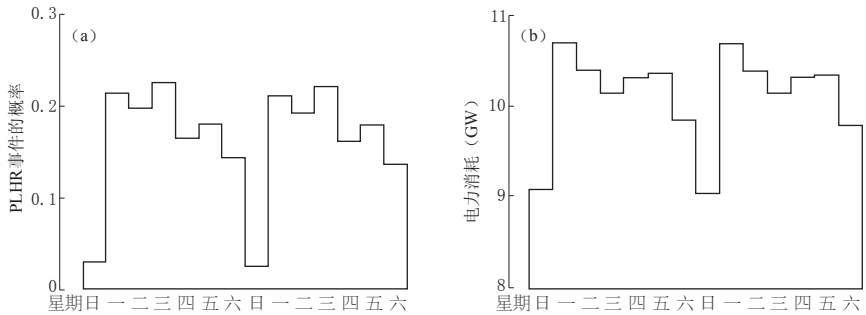

图 1 一周内在 Siple 站观测到的 PLHR (a)以及 Roberval 站的电力消耗(b)(引自 Park，Miller，1979)

Fig. 1 PLHR events observed at Siple (a) in one week and the power consumption at Roberval (b) (by Park，Miller，1979)

1983)．Helliwell 等观测到的 PLHR 大都出现在地磁扰动期间．

1981 年，Yearby 等学者对 Halley Bay 站和 St Anthony 站的地基观测数据进行分析，得到了纽芬兰上空频率间隔在(50±90)Hz 范围内变化的 PLHR 谱线(Matthews，Yearby，1981)．他们认为这些谱线的特征之所以与 Siple 站的观测结果不同，是因为纽芬兰采用的是 50 Hz 和 60 Hz 混合的电力系统．除了上述地基观测结果外，还存在 PLHR 现象的卫星观测结果．自 1976 年起，英国谢菲尔德大学物理系的 Bullough 等学者通过研究 Ariel-3 和 Ariel-4 卫星上的探测数据，指出北美上空辐射波强度的最大值主要是由于 PLHR 造成的，部分是由于闪电造成的(Bullough *et al*，1976；Tatnall *et al*，1983；Bullough，1983；Bullough *et al*，1985)．基于 Ariel-3 和 Ariel-4 卫星的探测数据，Kaiser 及其团队从地理位置、强度、磁暴时间、季节、太阳活动周期等几方面研究了 PLHR 的全球分布，以及电离层中与之相关的辐射波．1979 年，Luette 给出了从 OGO-4 卫星观测到的南美上空 PLHR 实例，如图 2 所示，谱峰间隔约为 100 Hz(Luette *et al*，1979)．1982 年，Bell 等利用 ISEE-1 卫星观测到了北美上空与 PLHR 相关的辐射波，其频率范围为 3—4 kHz．与地基观测结果类似，这些谱线的频率也偏离电网的谐波频率(Bell *et al*，1982)．这一时期从 S3-3、ISIS-2 等卫星上均观测到了 PLHR 现象．1983 年，日本电气通信大学的 Tomizawa 等学者利用探测气球对大气以及顶部电离层中的 PLHR 与磁亚暴之间的关系进行了研究．结果表明，磁亚暴会使 6 次、9 次、12 次谐波频率的辐射增强(Tomizawa，Yoshino，1984)．1985 年，他们利用 OHZORA 卫星探测数据，定量研究了东亚上空顶部电离层中输电线辐射的磁场强度．结果表明，60 Hz 的输电线辐射分布于日本岛上空，而 50 Hz 的输电线辐射分布在我国华东地区上空(Tomizawa，Yoshino，1985)．20 世纪 90 年代，Parrot 等对近

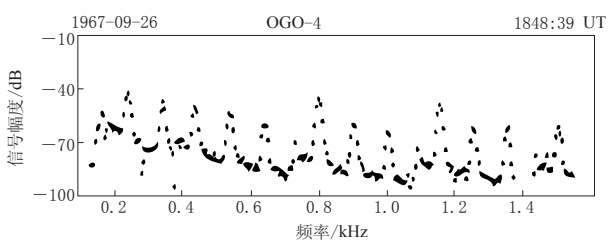

图 2 PLHR 频谱示例(引自 Luette *et al*，1979)

Fig. 2 Spectrum example of PLHR (by Luette *et al*，1979)

地轨卫星 Aureol-3 自 1981 年 10 月—1983 年 12 月探测到的电磁场强度进行了系统的分析，同样发现了 PLHR 现象，而且这种现象并不总是出现在工业发达国家的上空(Parrot，1990，1994；Parrot *et al*，1991). 1995 年，Molchanov 和 Parrot (1995)总结了从卫星上观测到的 PLHR 现象所具有的特征.

也有学者对 PLHR 的大小以及实验模拟等进行了研究. Tatnall 等(1983)和 Yearby 等(1983)的研究结果表明，在以 3.2 kHz 为中心的 1 kHz 频带内，北美上空的 PLHR 的总功率小于 100 W，其中由纽芬兰工业区中的典型输电线产生的 PLHR 总功率甚至小于 1 μW. Park 和 Chang (1978)利用甚低频发射机做的实验表明，在适当条件下，利用 0.5 W 的功率便可模拟出由 PLHR 在磁层中触发的甚低频发射. Helliwell 等(1980)通过实验指出，能够使透入磁层中的相干 VLF 信号增强且触发新辐射的 PLHR 的功率阈值为 1 W，测量该值可诊断磁层的不稳定水平.

正是由于输电线谐波辐射的功率较小，因而 PLHR 现象曾一度引起争议. 1979 年，Thorne 等针对 PLHR 能影响地球辐射带的观点提出疑义(Thorne，Tsurutani，1981). 1981 年，Tsurutani 和 Thorne 对 Luetter 等提出的 PLHR 能影响磁层的观点提出了质疑(Luette *et al*，1977；Tsurutani，Thorne，1981). Helliwell 团队与他们展开了激烈的讨论. 1985 年，Koons 又提出了在波粒相互作用的外磁层中 PLHR 并不起重要作用(Koons，1985). 对于研究者所观测的 PLHR 是由原始的输电线场传播进入电离层和磁层造成的，还是由原始的输电线场通过与电离层和磁层的等离子体或波的相互作用而激发的新的辐射，即磁层线辐射(magnetospheric line radiation，简写为 MLR)，也有学者展开了讨论(Molchanov，Parrot，1995；Volland，1995).

2　DEMETER 卫星与 PLHR

自 20 世纪 60 年代以来，国内外学者对地震前后的电离层状态进行了大量研究. 结果表明，大地震前电离层扰动(电磁辐射、等离子体参数变化和高能粒子沉降等)普遍存在. 分析电离层扰动已成为地震短临期预测的重要手段. 2004 年 6 月，法国国家空间研究中心发射了一颗专门服务于地震电磁监测的微型卫星 DEMETER，其采用的是与太阳同步的圆形轨道，倾角为 98.23°，高度为 710 km(从 2005 年 12 月中旬开始改为 660 km)，有效载荷包括感应式磁力仪、电场探测仪、等离子体分析仪、朗缪尔探针和能量粒子探测仪. 该卫星的发射不仅为研究由地震-电磁效应造成的电离层扰动提供了有利条件，也为研究人类活动，如 PLHR、VLF 发射机和高频传播站等，造成的电离层扰动提供了天基探测数据.

2005 年，Parrot 等利用 DEMETER 卫星探测数据得到了接近于 50 Hz 或 16⅔ Hz(对应于铁路供电系统频率)间隔的谱线(Parrot *et al*，2005). 该文献中给出了 4 个典型的 PLHR 事件：2004 年 7 月 23 日 09:12:30—09:23:34UT，赤道上空；2004 年 9 月 8 日 07:23:35—07:27:00UT，伊朗和伊拉克上空；2005 年 1 月 21 日 19:41:04—19:48:30UT，埃及、地中海和土耳其上空；2005 年 1 月 23 日 02:04:10—02:08:30 UT，印度尼西亚群岛上空. 研究结果表明，这些 PLHR 事件均出现在中强磁暴期间. Nemec 等对 DEMETER 卫星运行第一年所获得的探测数据进行了分析，发现了多个以 50/100 Hz、60/120 Hz 为间隔的 PLHR 事件，这些事件的出现与地磁活动水平无关(Nemec *et al*，2006，2007). 另外，部分事件表明，PLHR 是以右旋偏振哨声模传播的. 利用 DEMETER 卫星探测数据得到了

以 50/100 Hz、60/120 Hz 为频率间隔的 PLHR 地理分布图，如图 3 所示. 图中，大黑点表示所观测到的 PLHR 事件的地理位置；细线和小黑点表示磁力线和观测点的位置.

目前，国内外已有学者利用 DEMETER 卫星探测数据对我国大地震(例如云南普洱地震、四川汶川地震等)发生前的电离层扰动开展了研究(朱荣等，2008；朱涛，2010；安张辉等，2010)，尚未有学者利用该卫星探测数据研究过我国空间的 PLHR 现象.

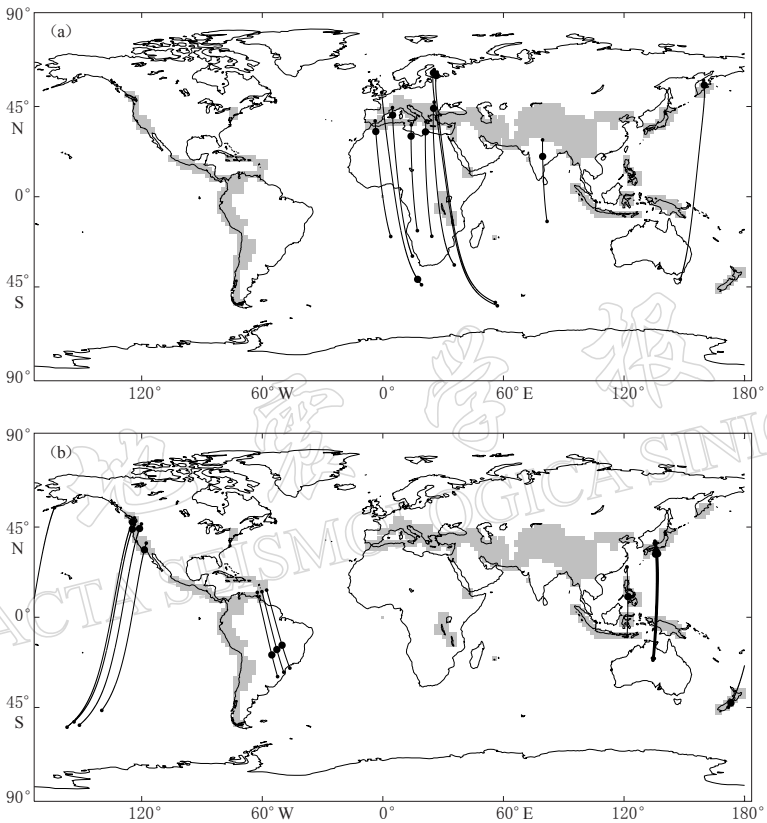

图 3 由 DEMETER 卫星获得的 PLHR 分布(引自 Nemec *et al*，2007)

(a) 以 50/100 Hz 为间隔；(b) 以 60/120 Hz 为间隔

Fig. 3 Distribution of PLHR observed by DEMETER (by Nemec *et al*，2007)

(a) Frequency separation of 50/100 Hz；(b) Frequency separation of 60/120 Hz

3 PLHR 现象的机理研究

尽管 PLHR 现象曾引起争议，但是随着多年地基观测和卫星探测数据的积累，PLHR 现象已得到公认. Kikuchi (1983)指出，地面上方由多个导体构成的输电系统根据传播模式的不同，可分为金属回路和大地回路两种. 金属回路是指仅由架空导线构成的电流通路，而大地回路是指由架空导线和大地构成的电流通路. 据此，输电线辐射可分为两类：由金属回路中的不连续点或终端产生的辐射；由大地的有限电导率和电容率造成的 Cerenkov 辐射. 在低于截止频率(10—100 MHz)的低频侧，Cerenkov 辐射被认为是穿透电离层、进入磁层的主要辐射源. 输电线辐射并不是以工频(50 Hz 或者 60 Hz)为主，而是以谐

波为主，例如由输电线的电晕放电、气体放电、终端负载的非线性等造成的谐波辐射. Schumann (1952)指出地球和电离层构成了一个谐振腔体，其谐振频率主要由地球的尺寸决定. 对于低于 100 Hz 的极低频输电线辐射，地球-电离层的波导理论是其产生的理论基础. 随着输电线谐波频率的增大(>1 kHz)，其辐射的电磁能量便有可能通过“哨声模”穿透地球-电离层谐振腔而进入磁层内. 1983 年，Tatnall 等研究了以大地为回路的输电线中流过不平衡谐波电流时产生的辐射场模型(Tatnall *et al*，1983). 1984 年，Inan 等利用回旋共振理论，研究了由地基 VLF 发射所引起的电子沉降现象(Inan *et al*，1984). 1991 年，Molchanov 等研究了从地面传播到电离层的波的特征，用以解释 PLHR 对磁层极低频发射的影响(Molchanov *et al*，1991). 1994 年，Bullough 等定性地解释了 PLHR 现象(Volland，1995). 如图 4 所示，输电线产生的谐波辐射(约数 kHz)穿过低电离层，沿着场向导管进入赤道区，在那里与逆流的高能电子发生相互作用. 这种波粒相互作用将放大 PLHR 波并触发甚低频发射. 到达南半球的部分辐射波将发生反射，反射波可以在磁共轭点之间来回传播多次，形成回波列. 1996 年，Parrot 和 Zaslavski 对人类活动对磁层的影响的物理

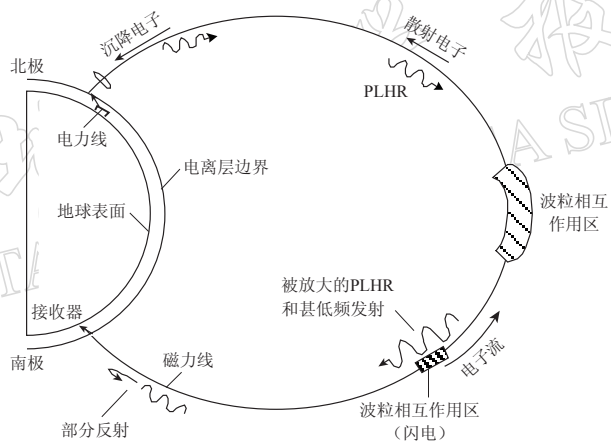

图 4　PLHR 原理示意图

Fig. 4　Schematic diagram of PLHR

机制进行了总结(Parrot，Zaslavski，1996). 2002 年，Ando 等假定电离层是各向异性的均匀介质，研究了 PLHR 在电离层中的传播规律(Ando *et al*，2002). 2005 年，Werner 等利用有限差分法计算了脉动信号在地球-电离层波导中的辐射场(Werner *et al*，2005).

尽管已有文献对 PLHR 的形成机理进行了研究，但是由于 PLHR 的传播媒质，如电离层和磁层等，往往具有随机不均匀的时空变化特点和复杂的边界条件，甚至具有各向异性和非线性，因此对于 PLHR 在由地球、中性层、电离层、磁层等构成的耦合空间中的传播模型仍需深入研究. 这是解释诸多疑问的关键. 例如，功率较小的 PLHR 为何能够影响电离层和磁层状态；PLHR 会对电离层和磁层造成多大的影响；在电网结构并无太大差异的地区，为何有的地区空间存在 PLHR 现象，而有的地区空间又不存在这种现象；磁层中的 PLHR 是由原始的电力线谐波辐射直接传播进入电离层和磁层造成的，还是由原始的电力线谐波辐射通过与电离层和磁层的等离子体或波的相互作用而触发的新的辐射，等等.

4 讨论与结论

我国是电力生产与消费的大国，年发电量仅次于美国. 目前，我国电力系统的发展已进入西电东送、南北互供和全国联网的新阶段，由1000 kV交流输电系统和±800 kV直流输电系统构成的特高压电网，已代表了世界输电技术的最高水平. 电源点建设规模的扩大、输变电技术的革新、电力设备的更换等，在很大程度上保证了电网的可靠和稳定运行，但同时也使谐波污染日益严重. 首先，在以三相交流为主的电力系统中，发电机由于三相绕组在制作上很难做到绝对对称，铁心也很难做到绝对均匀一致，这便使电源或多或少会产生谐波；三相电力变压器在设计时，考虑到经济性，其铁心的工作点通常选择在磁化曲线的近饱和段上，这样在实际运行时很容易使变压器铁心饱和，从而导致谐波. 其次，对于目前推行的高压直流输电系统，其需要整流装置和变流装置，而这些电力电子装置也是重要的谐波源. 另外，大量非线性用电设备的使用，如开关电源、变频装置、家用电器等，也使电网中不可避地的存在谐波.

根据已有研究结果可知，出现PLHR现象的区域大多位于高、中纬度，例如美国、法国、芬兰、日本、印度等，而我国大部分地区都处于中纬度. 我国电力系统除了额定电压等级、频率等与国外发达国家有所不同外，电力系统结构与国外并无太大差异，可以说很多新技术和电力设备也是借鉴国外的. 作者认为，随着我国电力系统规模的迅速发展，加之谐波污染的日益严重，电离层或磁层中也会存在PLHR现象，但这个观点还需要试验事实来验证.

考虑到我国地震电磁监测试验卫星项目已提上日程，其主要目标是：在全国乃至全球范围内获取空间电场、磁场和电磁辐射与高能粒子数据，研究与地震孕育发生相关联的电磁场和电离层变化，为地球系统科学等相关领域的研究与国际合作提供数据共享服务. 该卫星的发射可为深入研究我国的PLHR现象提供重要的天基观测数据. 另外，由于输电线谐波辐射同样会对电离层和磁层造成扰动，因此研究这种扰动的特征，对于认识地球的空间环境，特别是电离层环境，具有一定的科学价值；对地震电磁卫星记录的低频电磁效应的识别，地震电离层前兆信息的提取，以及与地震孕育过程相关联的机理研究等，也具有一定的参考意义.

随着全球电力消耗的增长，PLHR现象将变得更加显著. 只有通过更多的地基、天基观测数据，合理的数学模型，恰当的数值仿真方法等，才能科学地阐释这种现象的形成机理以及对电离层和磁层造成的影响. 我国尚未对PLHR现象开展专门的研究工作，有关PLHR现象的中文资料相当少. 但是结合电力系统发展以及电磁监测卫星发射等国情，我国对PLHR现象开展研究将具有重要的现实意义和长远意义.

参 考 文 献

安张辉，范莹莹，刘君，谭大诚，陈军营，郑国磊，解滔. 2010. 汶川 M_S8.0地震前DEMETER卫星探测的离子温度变化分析[J]. 地震学报，**32**(6)：754-759.

熊皓. 2004. 电磁波传播与空间环境[M]. 北京：电子工业出版社：4.

朱荣，杨冬梅，荆凤，杨俊英，欧阳新艳. 2008. DEMETER卫星观测到的云南普洱地震前的电离层扰动[J]. 地震学报，**30**(1)：76-81.

朱涛. 2010. DEMETER卫星观测的LF/MF电场频谱特征初步研究[J]. 地震学报，**32**(4)：476-489.

张润宁，杨芳，王海明，陶志刚，刘森. 2009. 我国地震电磁监测卫星总体技术研究[J]. 地震，**29**(增刊)：10-16.

Ando Y，Hayakawa M，Molchanov O A. 2002. Theoretical analysis on the penetration of power line harmonic radiation into the ionosphere[J]. *Radio Science*，**37**(6)：1093-1104.

Bell T F，Luette J P，Inan U S. 1982. ISEE 1 observations of VLF line radiation in the Earth's magnetosphere[J]. *J Geophys Res*，**87**(A5)：3530-3536.

Bullough K，Tatnall A R L，Denby M. 1976. Man-made ELF/VLF emissions and the radiation belts[J]. *Nature*，**260**：401-403.

Bullough K. 1983. Satellite observations of power line harmonic radiation[J]. *Space Sci Rev*，**35**：175-183.

Bullough K，Kaiser T R，Strangeways H J. 1985. Unintentional man-made modification effects in the magnetosphere[J]. *J Atmos Terr Phys*，**47**：1211-1223.

Helliwell R A. 1965. *Whistlers and Related Ionospheric Phenomena*[M]. USA：Stanford University Press：1-349.

Helliwell R A，Katsufrakis J P，Bell T F，Raghuram R. 1975. VLF line radiation in the Earth's magnetosphere and its association with power system radiation[J]. *J Geophys Res*，**80**(31)：4249-4258.

Helliwell R A，Carpenter D L，Miller T R. 1980. Power threshold for growth of coherent VLF signals in the magnetosphere[J]. *J Geophys Res*，**85**(A7)：3360-3366.

Inan U S，Chang H C，Helliwell R A. 1984. Electron precipitation zones around major ground-based VLF signal sources[J]. *J Geophys Res*，**89**(A5)：2891-2906.

Kikuchi H. 1983. Overview of power-line radiation and its coupling to the ionosphere and magnetosphere[J]. *Space Sci Rev*，**35**：33-41.

Koons H C. 1985. Whistlers and whistler-stimulated emissions in the outer magnetosphere[J]. *J Geophys Res*，**90**(A9)：8547-8551.

Luette J P，Park C G，Helliwell R A. 1977. Longitudinal variations of very low-frequency chorus activity in the magnetosphere：Evidence for excitation by electrical power transmission lines[J]. *Geophys Res Letters*，**4**(7)：275-278.

Luette J P，Park C G，Helliwell R A. 1979. The control of the magnetosphere by powerline radiation[J]. *J Geophys Res*，**84**(A6)：2657-2660.

Matthews J P，Yearby K. 1981. Magnetospheric VLF line radiation observed at Halley，Antarctica[J]. *Planet Space Sci*，**29**(1)：97-106.

Molchanov O A，Parrot M，Mogilevsky M M，Lefeuvre F. 1991. A theory of PLHR emissions to explain the weekly variation of ELF data observed by a low-latitude satellite[J]. *Ann Geophys*，**9**(10)：669-680.

Molchanov O，Parrot M. 1995. PLHR emissions observed on satellites[J]. *J Atmos Terr Phys*，**57**(5)：493-505.

Nemec F，Santolik O，Parrot M，Berthelier J J. 2006. Power line harmonic radiation (PLHR) observed by the DEMETER spacecraft[J]. *J Geophys Res*，**111**：A04308.

Nemec F，Santolik O，Parrot M，Berthelier J J. 2007. Power line harmonic radiation：A systematic study using DEMETER spacecraft[J]. *Advances in Space Research*，**40**(3)：398-403.

Park C G，Helliwell R A. 1978. Magnetospheric effects of power line radiation[J]. *Science*，**200**(4343)：727-730.

Park C G，Chang D C D. 1978. Transmitter simulation of power line radiation effects in the magnetosphere[J]. *Geophys Res Lett*，**5**(10)：861-864.

Park C G，Miller T R. 1979. Sunday decreases in magnetospheric VLF wave activity[J]. *J Geophys Res*，**84**(A3)：943--950.

Park C G，Helliwell R A. 1983. Ground observations of power line radiation coupled to the ionosphere and magnetosphere[J]. *Space Sci Rev*，**35**：131-137.

Parrot M. 1990. World map of ELF/VLF emissions as observed by a low-orbiting satellite[J]. *Annales Geophysicae*，**8**：135-146.

Parrot M，Molchanov O A，Mogilevski M M，Lefeuvre F. 1991. Daily variations of ELF data observed by a low altitude satellite[J]. *Geophys Res Lett*，**18**(6)：1039-1042.

Parrot M. 1994. Observations of power line harmonic radiation by the low-altitude AUREOL-3 satellite[J]. *J Geophys*

地震学报 ACTA SEISMOLOGICA SINICA

Res, **99**(A3): 3961-3969.

Parrot M, Zaslavski Y. 1996. Physical mechanisms of man-made influences on the magnetosphere[J]. *Surv Geophy*, **17**(1): 67-100.

Parrot M, Nemec F, Santolik O, Berthelier J J. 2005. ELF magnetospheric lines observed by DEMETER[J]. *Annales Geophysicae*, **23**: 3301-3311.

Schumann W O. 1952. Über die strahlungslosen Eigenschwingungeneiner leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist[J]. *Zeitschrift und Naturfirschung*, **7a**: 149-154.

Tatnall A R L, Matthews J P, Bullouth K, Kaiser T R. 1983. Power-line harmonic radiation and the electron slot[J]. *Space Sci Rev*, **35**: 139-173.

Thorne R M, Tsurutani B T. 1981. Comment on "Sunday decreases in magnetosphere VLF wave activity" by C. G. Park and T. R. Miller[J]. *J Geophys Res*, **86**(A3): 1639-1641.

Tomizawa I, Yoshino T. 1984. Power line radiation over northern Europe observed on the balloon B15-1N[J]. *National Institude of Polar Research*, **31**: 115-123.

Tomizawa I, Yoshino T. 1985. Power line radiation observed by the satellite OHZORA[J]. *J Geomagn Geoelect*, **37**(3): 309-327.

Tsurutani B T, Thorne R M. 1981. A skeptic's view of PLR effects in the magnetosphere[J]. *Advances in Space Res*, **1**(2): 439-444.

Volland H. 1995. *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*[M]. USA: CRC Press: 291-332.

Werner S M, Rodger C J, Thomson N R. 2005. Identifying power line harmonic radiation from an electrical network[J]. *Annales Geophysicae*, **23**: 2107-2116.

Yearby K H, Smith A J, Bullough K. 1983. Power line harmonic radiation in Newfoundland[J]. *J Atmos Terr Phys*, **45**(6): 409-419.

地震学报 ACTA SEISMOLOGICA SINICA